

Ф.И. Яковлев, д-р техн. наук,
М.В. Репетенко, канд. тех. наук,
В.П. Маршуба, канд. тех. наук,
Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

В статье представлены результаты экспериментов по определению влияния режимов термической обработки на структуру и свойства титановых сплавов. При использовании результатов, определенных в ходе проведения опытов по определению оптимальных режимов закалки и старения, возможно управление процессом формирования структуры и свойств этих сплавов, что позволяет повысить эксплуатационную надежность изделий, а также производительность труда при их производстве.

Введение. Титановые сплавы при достаточно хорошей пластичности, высокой прочности и малой плотности обладают высокой прочностью при 20...25° С и повышенных температурах. Поэтому титановые сплавы получили широкое распространение в авиации, судостроении, химической, ракетной и других отраслях промышленности. Свойства титановых сплавов зависят не только от режимов закалки и старения, но и от наличия примесей, особенно от содержания в химическом составе сплава водорода, кислорода, углерода и азота, которые с титаном образуют твердые растворы внедрения. Помимо этого в зависимости от содержания этих элементов в микроструктуре образуются промежуточные фазы: карбиды, оксиды, нитриды. Так, даже небольшое содержание этих элементов, а именно до 0,1%, повышает твердость, временное сопротивление и предел текучести, однако при этом существенно уменьшается пластичность. Водород мало растворим в α - фазе и в основном присутствует в микроструктуре сплава в виде обособленных, отдельных микро участков гидридов, резко снижающих пластичность сплава. Так при содержании водорода в химическом составе сплава до 0,05% ударная вязкость α - фазы снижается с 0,06 МДж/м² до 0,1 МДж/м². И так как при нагреве титановые сплавы активно поглощают газы: в интервале 50...100° С – водород, при 400...500° С – кислород, а при 600...700° С – азот, окись углерода углекислый газ. Отсюда следует,

что очень важно выбирать такую температуру старения, которая бы обеспечила наряду со снятием закалочных остаточных напряжений и выделение из α - фазы β - фазы минимальное насыщение сплава, указанными выше примесями. Наряду с важностью правильного выбора температуры старения, не менее важно и правильно выбрать температуру закалки. Это обусловлено, тем, что при температурах закалки имеет место рост зерна как α - фазы, так и β - фазы с относительно большой скоростью. Поэтому в ряде случаев при термической обработке деталей машин в производственных условиях термическая обработка существенно повышает статическую прочность сплава, но зато снижает ударную вязкость и особенно пластичность. На основании изложенного можно отметить, что проведение исследований по установлению оптимального режима термической обработки титановых сплавов имеет практическое значение, особенно для авиационной и ракетной промышленности.

Целью работы является установление оптимальной температуры термической обработки и её продолжительности для титановых сплавов, то есть получения оптимальной структуры и свойств сплава. На основе найденных закономерностей термической обработки титановых сплавов, разработать научно-обоснованные рекомендации применительно к производству деталей из этих сплавов.

Анализ последних достижений и публикаций. Состав, условия производства и свойства титановых сплавов регламентируются требованиями ГОСТ 19.807-74 [1]. Однако зависимость изменения свойств и структуры от температуры закалки и её продолжительности выдержки, а также условий старения для титановых сплавов этим ГОСТом не регламентируется. Формирование свойств и структуры сплавов во многом определяется режимами закалки и старения. Поэтому установление оптимальной температуры закалки и продолжительности выдержки при этой температуре, а также условий старения имеет известное эксплуатационное значение.

В монографии [2] указано, что титан имеет ГПУ кристаллическую решетку, а его атомный диаметр равен 2,93 кХ и имеет ГЦК решетку. Атомный диа-

метр алюминия равен 2,8...2,85 кХ и имеет ГЦК решетку. Кристаллическая решетка ванадия ОЦК, а его атомный диаметр равен 2,71 кХ. Молибден обладает ОЦК кристаллической решеткой, а его атомный диаметр равен 2,80 кХ. Отсюда следует, что легирующие элементы, входящие в состав сплава, обладают благоприятным критерием геометрического фактора, и как следствие образуют с титаном твердый раствор замещения со значительной областью гомогентности.

Для обеспечения заданных свойств и структуры, предусмотренных этим ГОСТом, титановые сплавы подвергаются термической обработке (закалке), которая осуществляется при достаточно высокой температуре, затем искусственному старению. При этом необходимо отметить, что многие детали из титановых сплавов получают методом литья. Но, как известно, в отливках не исключено возникновение пористости, незначительного количества неметаллических включений и других литейных дефектов. На этом основании можно отметить, что режимы термической обработки, предусмотренные ГОСТом, не позволяет постоянно получать требуемые свойства и структуру титановых сплавов. Поэтому данный фактор послужил основой для проведения исследований.

Изложение основного материала. Исследование влияния термической обработки на статическую прочность титановых сплавов проводили на заготовках - образцах, изготовленных из титанового сплава ВТ-16, химический состав которых регламентирует ГОСТ 19.807-74 [1]. Значения статической прочности определяли на образцах по стандартной методике, а микроструктуру испытанных образцов исследовали на микроскопе МИМ-7 при увеличении в 500 раз. Заготовки – образцы закаливались с температур интервала 925...1025° С через 25° С, а охлаждались в воде. После закалки образцы – заготовки подвергались старению при температуре 525° С в продолжение 30 минут. По каждому из режимов обрабатывалось не менее 5 заготовок – образцов. В соответствии с ГОСТ 19.807-74 в химический состав сплава ВТ-16 входят следующие элементы : 1,6...3,8% Al, 4,0...5,0% V, 4,5...5,5 %Mo.

При выборе температуры закалки важно знать влияние легирующих элементов на температуру мартенситного превращения. Так, молибден оказывает

большее влияние на снижение температуры начала мартенситного превращения, чем титан, а алюминий снижает склонность сплава ВТ-16 к водородной хрупкости и образует с титаном α - твердый раствор и β - твердый раствор в эвтектоидном интервале температур. К тому же молибден и ванадий стабилизируют β - фазу и уменьшают склонность сплава к образованию упорядоченной структуры и тем самым способствуют повышению его статической прочности с помощью термической обработки. На основании изложенных факторов можно отметить, что при температуре 20...25° С в литом состоянии титановый сплав ВТ16 имеет микроструктуру α - твердого раствора, в котором включены обособленные микрообъемы включений промежуточных фаз, таких как гидриды, оксиды и нитриды в виде тонких пластин неодинаковой длины, расположенных по границам зерен.

При нагреве заготовок-образцов до температуры закалки сплав в указанных выше интервалах температур насыщается водородом, кислородом и азотом. И поскольку длительность пребывания заготовок-образцов при температурах этого интервала небольшая, в связи с их загрузкой в предварительно нагретую печь до температур закалки, то можно считать, что при нагреве заготовок-образцов до температуры закалки в структуре сплава незначительно повышается содержание этих элементов. При достижении эвтектоидной температуры начинается происходить процесс температурного превращения α - фазы в β - фазу. Полнота завершения этого процесса определяется температурой закалки. Так, при 925° С в сплаве ВТ16 полиморфные превращения частично завершаются, так как температура 925° С меньше эвтектической. В результате микроструктура состоит из $\alpha+\beta$ - фаз. Равновесное их соотношение обуславливается при этой температуре продолжительностью выдержки. Однако из-за большой скорости роста зерна выдержка при этой температуре должна быть относительно небольшой. Так, металлографический анализ показал, что при выдержке в течение 30 минут величина зерна в основном соответствует 5...6 баллу стандартной шкалы (ГОСТ 5639-82). Поэтому дальнейшее увеличение выдержки

заготовок-образцов при 925° С приведет к укрупнению величины зерна. Данная зависимость не дает возможность увеличить количество β - фазы до значения, которое имеет место в равновесном состоянии, и как следствие при неизменном процессе старения и условий охлаждения титановый сплав ВТ16 после термической обработки имел невысокие свойства, результаты которых приведены в таблице.

Таблица

Структура и механические свойства после термической обработки титанового сплава ВТ16

N п/п	Т°, С закалки	Механические свойства			Микроструктура
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	
1	925	1230	1070	11	$\alpha+\beta$ -фазы
2	9500	1380	1150	9	
3	1000	1460	1210	6	
4	1025	1240	1130	5	

После закалки заготовок-образцов микроструктура состояла из мартенсита α^1 -фазы. Иглы мартенсита имели одну и ту же ориентацию в пределах одного и того же зерна. В процессе старения из α^1 -фазы выделяется β - фаза, дисперсность которой зависит от величины зерна. Отсюда β - фаза обладает наибольшей дисперсностью после закалки с 925° С и последующего старения, вызывающего снижение временного сопротивления и повышения пластичности сплава.

При повышении температуры закалки с 925° С до 950° С увеличивается как временное сопротивление, так и предел текучести при незначительном снижении пластичности. Поскольку при работе многих деталей машин пластическая деформация не допустима, то их несущую способность определяют по пределу текучести, а надежность работы деталей оценивают по пластичности. Сочетание относительно высоких значений прочности и пластичности позволяет отметить, что закалка с 925° С обеспечивает возможность повысить сопротивление титанового сплава ВТ16 пластической деформации при относительно небольшом снижении надежности, т.е. при пластичности равной 9% при вре-

менном сопротивлении 1380 МПа сплав обладает высоким сопротивлением хрупкому разрушению. Повышение σ_b и δ связано с увеличением объемом β - фаза при температуре 950° С. Отсутствие завершения полиморфного превращения α - фазы в β - фазу обусловлено тем, что в соответствии с диаграммой состояния Ti-Al при содержании алюминия до 3,8% при 950° С α - фаза и β - фаза находятся в равновесном состоянии.

Из анализа свойств приведенных в таблицы, следует, что максимальное значение временного сопротивления и предела текучести обеспечивается закалкой с температурой в 1000° С. Такая зависимость обусловлена завершением превращения α - фазы в β - фазу и выравниванием состава в β - фазе за счет диффузионных процессов. В процессе охлаждения превращения протекают по мартенситному механизму с образованием α^1 -фазы. Относительно небольшая длина игл α^1 -фазы свидетельствует о незначительном увеличении зерна. При получении $\sigma_b=1460$ МПа и $\sigma_{0,2}=1210$ МПа пластичность незначительно снижается и равна 6%.

Дальнейшее повышение температуры до 1025° С связано с понижением как σ_b и $\sigma_{0,2}$, так и δ . Так, $\sigma_b=1240$ МПа и $\sigma_{0,2}=1130$ МПа, $\delta=5\%$. Такое падение свойств титанового сплава BT16 связано с относительно большой скоростью роста зерна при температуре выше эвтектической. Результаты металлографического исследования показали, что после выдержки 30 минут при температуре 1025° С величина зерна соответствует 3...4 баллам. При этом следует отметить, что в микроструктуре в основном преобладает наличие зерен 3 балла. По экспериментальным данным построены кривые зависимости изменения механических свойств титанового сплава BT16 от температуры закалки, которые приведены на рисунке.

Анализ кривых, характеризующих зависимость изменения свойств титанового сплава BT16 от температуры закалки, показывает, что с повышением температуры закалки от 925° С до 1000° С временное сопротивление равномерно увеличивается. Рост σ_b обусловлен увеличением β - фазы в процессе превраще-

ния α - фазы в β - фазу и большим легированием β - фазы, с повышением температуры от 925° С до 1000° С. В процессе охлаждения сплав имеет структуру мартенсита α^1 -фазы, обладающей высокой дисперсностью. При температуре старения из α^1 -фазы выделяется β - фаза, снижающая прочность и повышающая

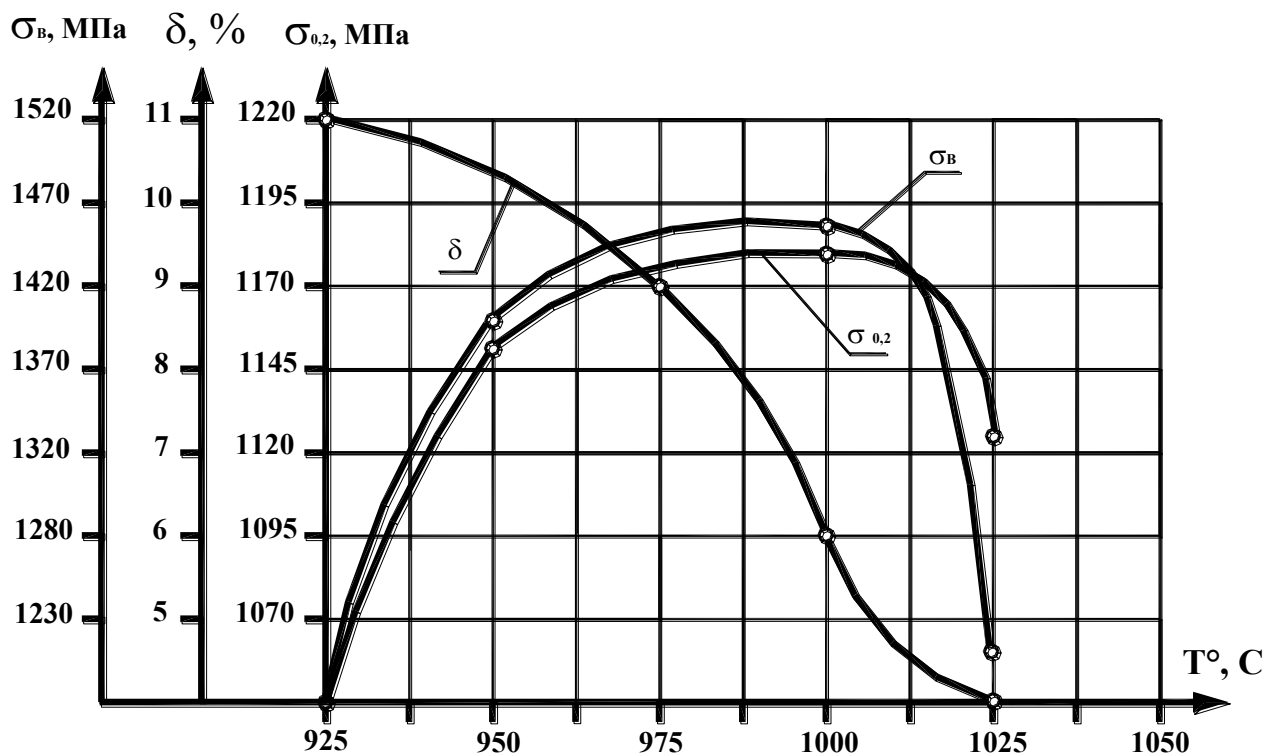


Рисунок - Влияние температуры закалки на свойства титанового сплава BT16

пластичность титанового сплава BT16. Наибольшего значения, как временного сопротивления, так и предела текучести, позволяет получить закалка с температурой 1000° С. И даже при максимальном значении прочностных свойств титановый сплав BT16 обладает сравнительно высокой пластичностью. Получение оптимального соотношения прочности и пластичности позволяет снизить металлоемкость деталей, что особенно важно для авиационной и ракетной отрасли промышленности, а следовательно, связано с повышением надежности и долговечности изделий указанных отраслей промышленности.

При температурах выше эвтектической α - фаза полностью превращается в β - фазу и из-за большой скорости роста зерна величина зерен β - фазы быстро

увеличивается, что обуславливает существенное снижение, как прочности, так и пластичности титанового сплава BT16.

Таким образом, анализ кривых зависимости свойств титанового сплава BT16 от температуры закалки позволяет отметить, что оптимальной температурой закалки этого сплава является температура 1000° С, а допустимой – 950° С.

Выводы. На основании анализа результатов проведенных исследований влияния температуры закалки на повышение свойств титанового сплава BT16 можно сделать следующие выводы:

1. Легирующие элементы, входящие в химический состав титанового сплава BT16, образуют в его литой структуре твердый раствор α - фаза, насыщение сплава водородом, кислородом и углеродом образует такие промежуточные фазы как гидриды, оксиды, нитриды и карбиды.

2. Оптимальной температурой закалки титанового сплава BT16 является температура 1000° С, позволяющая получить максимальные механические свойства, что обеспечивает возможность сплаву оказывать большое сопротивление пластической деформации от рабочих напряжений деталей, а его относительно высокая пластичность после термической обработки устраняет возможность хрупкого разрушения деталей различных машин.

3. оптимальное соотношение прочности при статической нагрузке и пластичности позволяет снизить массу деталей без уменьшения их надежности работы, что очень важно для летательных аппаратов.

4. При температурах выше 1000° С скорость роста зерна значительно увеличивается, вследствие чего образуется крупнозернистая структура β - фазы, приводящая к существенному снижению механических свойств титанового сплава BT16 после его термической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 19807-74* «Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки.

2. *Металлография железа*. Том 1 Перевод с английского под ред. акад. АН Грузн. ССР Ф.Н. Тавадзе. – М.: Металлургия. 1972, 246 с.

Представлена в редакцию 22.11.2003